균열모델을 사용한 철근콘크리트 구조물의 비선형거동 해석에 관한 연구

A Study on Nonlinear Behavior of RC Structure using Different Crack Models

김 성 칠* 안 영 기** 박 성 용***

Kim, Sung-Chil Ahn, Young-Ki Park, Sung-Yong

Abstract

A analysis of crack behavior in RC member was performed by nonlinear finite element method. Two crack models were used in F.E.M.(finite element method): one was FCM (the fixed crack model) and the other was RCM (the rotated crack model). Based on parametric study, the ratio of shear steel, strength of concrete, and a/d(shear span/effective depth) were compared with test results of references. According to the test results, when the member behavior was affected by the shear or diagonal tension, RCM was reasonable. However, when the behavior was affected by the flexibility, FCM was more appropriate. In addition, each crack model behavior for the change of shear steel ratio, the increase of strain energy was constant in FCM, but it was different in RCM because of diagonal crack distribution and crack width. Since the strength of concrete is affected not only by shear but also by flexural strength, each crack model behavior yields similar results.

keywords : RC Member, Fixed Crack Model, Rotated Crack Model.

1. 서 론

최근 유한요소해석으로 콘크리트부재의 파괴형태를 해석할 때에 해석의 정확도를 높이기 위하여 파괴역학을 고려한 해석이 수행되고 있다. 특히, 전단파괴는 RC구조물의 대표적인 파괴형태 중의 하나이지만, 전단파괴로 생기는 내하기구(耐荷機構)는 복잡하고 여러 가지 요인에 의해 영향을 받기 때문에 전단거동의 정도를 양호하게 파악하기 위해서는 적절한 재료의 특성 및 사용할 균열모델을 결정하는 것이 매우 중요하다.

그리고, 이러한 파괴를 해석적으로 파악하려고 하는 경우, 일반적으로 고정균열모델 (Fix Crack Model)

* 정회원, 경기대학교 토목·환경공학부 교수

** 정회원, (주)쌍용엔지니어링 대표이사

*** 정회원, 경기대학교 대학원 박사과정

E-mail : sung7kim@kyonggi.ac.kr 011-382-6701

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2003년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

[6],[8]이 많이 사용되어 왔으나, 균열로 인한 콘크리트의 거동특성으로 인하여 균열전단전달(龜裂剪斷傳達)과 인장강성을 고려한 해석에서는 전단파괴, 특히 사인장파괴를 충분히 표현하지 못하는 모델로 알려져 있다. 그 원인으로 예를 들면 콘크리트 전단전달기구(剪斷傳達機構)는 복잡하고, 전단특성을 적절히 모델화하는 것이 곤란하며 또한 인장강성 모델이 균열의 분산성(分散性)을 전제(前提)로 하여 적용되는 모델로 알려져 있다. 이러한 문제에 대해서는 무근콘크리트의 극한거동해석에서 그의 유효성이 확인되어지고 있는, 회전균열모델 (Rotate Crack Model)[7],[12]을 사용하는 경우가 많다. 그러나, 여러 가지 변수에 따라 달리 해석되므로 두 요소모델에 대해 상반되는 의견을 제시하는 경우가 있다. 따라서 본 연구에서는 철근콘크리트 보를 대상으로 여러 변수의 변화에 따른 두 균열모델의 특성을 확인하고자 한다. 여기서는 재료특성과 균열모델은 파괴에너지에 기인하여 인장연화특성을 고려하였다. 보의 파괴메카니즘에 변수로 작용하는 전단지간비(a/d), 전단철근비, 콘크리트강도 등의 변화에 따른 두 균열모델을 사용해서 해석하고 문헌의 실험치[1],[2],[3],[4]와 비교, 분석하였다. 두 모델의 균열분포의 특성과 적용성을 고찰함에 있어 2차원 비선형 유한요소법에 의해 해석하였고, 철근콘크리트 해석프로그램은 Cervenka Consulting의 ATENA을 사용하였다.

2. 유한요소 해석

콘크리트는 4절점 사각형 요소를 사용하였고, 비선형해석 Newton-Raphson방법을 이용하였다. 철근은 사각형요소내에 묻혀 있는 형태(Embedded reinforcing bar)로 모델링 되었으며, 이는 요소의 각 변과 철근의 변위에 대해 변위적합조건을 만족하도록 한 것이다. 철근의 응력과 변형률 관계는 완전 탄소성으로 가정하였다. 콘크리트의 재료적 성질은 다음과 같다.

2.1 콘크리트의 응력-변형률 관계

콘크리트의 응력-변형률 관계는 압축부와 인장부로 구분하여 나타낼 수 있다. 압축부는 콘크리트 최대압축응력까지의 응력-변형률의 상승부는 CEB-FIP code 90[5]의 제안식인 식 (1)을 사용하였다. Fig. 1은 압축부 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이며, Fig. 2는 압축부 연화곡선모델을 나타낸 것이다.

$$f_c = f_{cm} \cdot \frac{kx - x^2}{1 + (k-2)x}$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \quad , \quad k = \frac{E_o}{E_c} \tag{1}$$

여기서, f_c: 콘크리트의 압축응력(kgf/㎠)

f_{cm}: 콘크리트 최대압축응력(kgf/㎠)

ε_c: 최대압축응력의 변형률

E_o: 초기접선 탄성계수(kgf/㎠)

E_c: 할선탄성계수(kgf/㎠) ($E_c = \frac{f_{cm}}{\varepsilon_c}$)

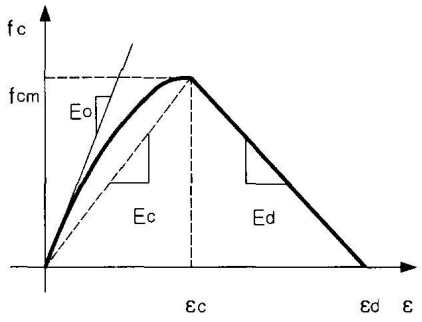


Fig. 1 콘크리트 압축부 응력-변형률곡선

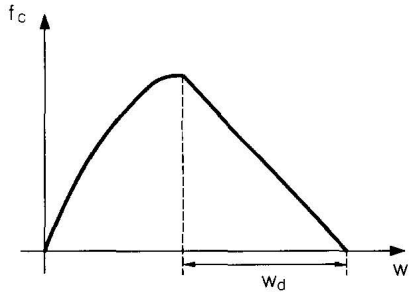


Fig. 2 압축부 연화곡선 모델

최대압축응력 이후 응력의 연성화는 선형으로 가정하였으며, 가상압축면 모델(Van Mier, 1986)[11]에 근거하였다. 즉 압축파괴는 압축 주응력의 방향에 대해 수직면에서 국부적이며 모든 최대압축응력 후의 변위와 에너지지 방출은 이 면에서 국부적이다. 이러한 가정은 구조물의 크기에 영향을 받지 않는다는 가정을 바탕으로 한다. 연화곡선의 마지막 점은 소성변위(W_d)로 표현하며 Van Mier의 실험에 의해 W_d는 보통콘크리트 강도에서 약 0.5mm 정도로 제안되었으며, 이 값을 사용하여 압축부의 연성거동을 식 (2 a,b)와 같이 나타내었다. 또한 그래프로 나타내면 Fig. 3과 같다.

$$\varepsilon_d = \varepsilon_c + \frac{W_d}{L_d} \quad , \quad E_d = \frac{f_{cm}}{\varepsilon_d - \varepsilon_c} \qquad (2\ a,b)$$

여기서, ε_d : 압축응력이 0 일 때의 변형률

L_d : 균열방향에 대한 요소의 길이

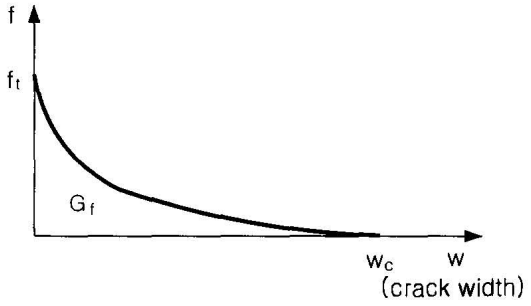


Fig. 3 인장부의 Crack-opening 모델

콘크리트의 인장부는 균열이 발생하기 전까지 선형탄성으로 가정하며, 균열발생 후의 콘크리트 인장부의 거동은 파괴에너지와 Crack-opening 법칙을 바탕으로 하는 가상균열모델에 근거한다. 이 모델은 콘크리트에서 안정적인 균열의 진행을 형성하게 하며 균열띠 이론과 조합하여 사용된다.

여기서는 Hordijk(1991)[9]의 Crack-opening모델을 사용하였다.

$$\frac{f}{f_t} = \left\{1 + c_1\left(\frac{w}{w_c}\right)^3\right\}\exp\left(-c_2\frac{w}{w_c}\right) - \frac{w}{w_c}(1 + c_1^3)\exp(-c_2) \qquad (3)$$

여기서, $w_c = 5.14\frac{G_f}{f_t}$ (mm)

$c_1 = 3$, $c_2 = 6.93$

G_f : 파괴 에너지(N/m)

w : Crack-opening(mm)

f : 콘크리트 인장응력(kgf/㎠)

f_t : 콘크리트 인장강도(kgf/㎠)

2.2 균열모델

콘크리트의 균열에 대한 모델은 분산균열모델(Smeared Crack Model)을 사용하였다. 분산균열모델은 고정균열과 회전균열로 구분된다. 균열이 발생하기 전에 콘크리트는 등방성으로 가정하며, 주응력이 콘크리트의 인장강도를 초과할 경우 균열로 인하여 요소의 재료는 이방성 연속모델(Orthotropic Constitutive Model)로 대치하게 된다.

2.2.1 고정균열모델[6],[8]

Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이, 고정균열모델에서의 균열방향은 초기균열의 발생시점에서의 주응력 방향에 의해 결정되고, 초기균열의 직각방향을 m_1축, 평행방향을 m_2축으로 한다. 그리고, 하중이 증가하는 동안에도 요소내 균열방향은 초기균열과 동일한 방향으로 고정시키므로 말미암아 축 m_1, m_2는 변하지 않는 요소모델의 축이 된다. 그런데 하중증가에 의해 추가 균열발생 및 기존 균열진전으로 인해서 주변형률축 ε_1과 ε_2이 회전하여 m_1, m_2 축과 일치하지 않게 되므로 균열면에 전단응력이 발생, 이때 m_1, m_2 축방향의 수직응력 σ_{c1}, σ_{c2}는 주응력이 아니게 된다.

이러한 경우, 전단탄성계수는 Kolmar(1986)[10]에 의해 제안된 식 (4 a,b)에 의해 결정된다.

$$G = r_g G_c \ , \quad r_g = c_3 \frac{-\ln(\frac{\varepsilon_u}{c_1})}{c_2} \qquad (4\ a,b)$$

여기서, $c_1 = 7 + 333(\rho - 0.005)$

$c_2 = 10 - 167(\rho - 0.005)$

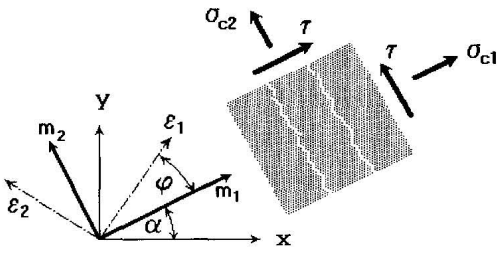
$c_3 = 1 \ , \ 0 \le \rho \le 0.02$

여기서 G는 균열후 전단계수, r_g는 전단유지계수, G_c는 선형전단탄성계수이며, c_1, c_2는 균열이 통과하는 철근에 의해 결정되는 상수이며, ρ는 균열면을 통과하는 철근에 대한 철근비이다.

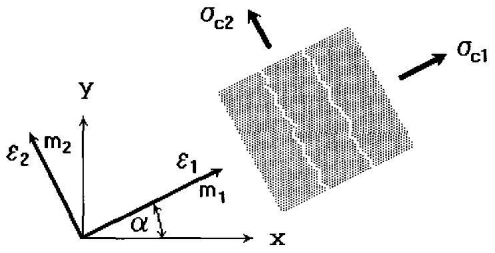
2.2.2 회전균열모델[7],[12]

회전균열모델은 균열 후 콘크리트 재료의 이방성축이 주 변형률의 방향과 일치한다. 따라서 주응력 방향과 주변형률 방향이 일치하여 균열면에 전단응력이 발생하지 않으며, Fig. 4(b)에서처럼 단지 두 개의 수직응력 성분만이 정의될 수 있다. 하중이 증가하는 동안 주변형률이 회전한다면 균열방향 역시 회전한다. 재료의 이방성축과 주변형률축이 일치하기 위해서 접선전단계수 G_t은 Crisfield[7]가 제안한 다음 식에 의해 계산한다.

$$G_t = \frac{\sigma_{c1} - \sigma_{c2}}{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \qquad (5)$$



(a) 고정균열모델



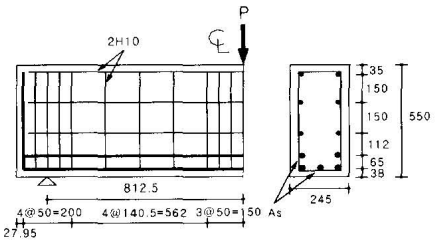
(b) 회전균열모델

Fig. 4 각 균열모델의 재료의 이방성축과 주변형률축과의 관계

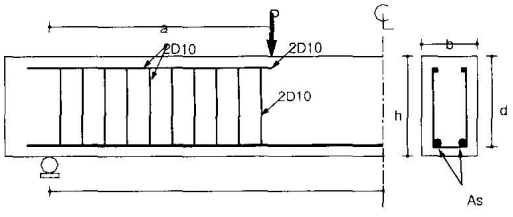
3. 해석결과 및 비교고찰

3.1 a/d에 따른 거동변화

철근콘크리트 보의 파괴거동은 전단지간/유효높이비(a/d)에 따라 보의 전단강도, 사인장강도, 휨강도에 의해 결정된다. 철근콘크리트 보의 파괴거동에 대해 a/d의 범위에 따른 고정균열모델과 회전균열모델을 사용한 해석결과를 실험값과 비교하여 a/d에 따른 각 균열모델의 거동을 고찰하고자 한다. Fig. 5는 각 문헌의 실험에 대한 철근콘크리트 보시편의 형상 및 하중 재하조건을 나타내며, Table 1, Table 2는 시편의 제원, 재료의 특성 및 파괴형태를 나타낸 것이다.



(a) 시편 1



(b) 시편 2, 3, 4

Fig. 5 실험시편의 형상 및 철근배근

Table 1 시편의 제원

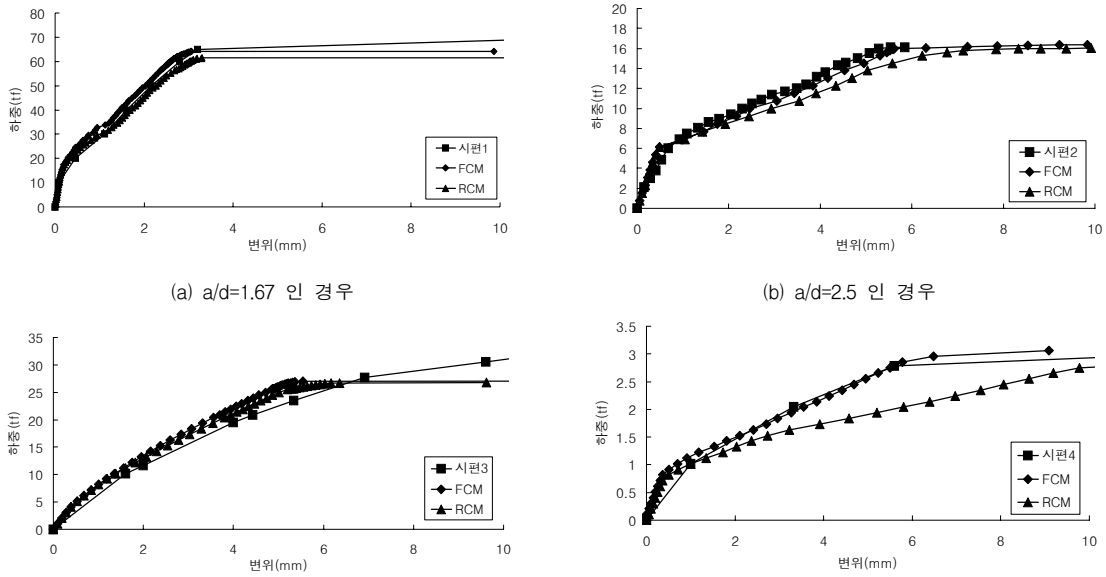
	b(cm)	h(cm)	d(cm)	a(cm)	L(cm)	a/d	s(cm)	$A_s(cm^2)$
시편1	24.5	55	48.625	81.25	81.25	1.67	수평:15 수직:14	9.93
시편2	25	46	40	100	150	2.5	10	5.73
시편3	20	30	26	100	100	3.85	6.5	19.272
시편4	15	20	16	100	100	6.25	0	2.4

Table 2 시편의 재료특성 및 파괴모드

	콘크리트 압축응력 (kgf/cm^2)	철근 항복응력 (kgf/cm^2)	전단 철근비	휨 철근비	항복하중 (tf)	변형 에너지 (tf · mm)	파괴 모드	비고
시편 1	320	4800	0.004	0.0083	65	125.0	휨 파괴	문헌1
시편 2	215	3000	0.0057	0.0057	16.53	63.2	휨 파괴	문헌2
시편 3	282	3690	0.011	0.0371	27.54	133.6	휨 파괴	문헌3
시편 4	260	3460	0	0.01	2.79	9.557	휨 파괴	문헌4

변형에너지: 항복하중까지의 변형에너지

Table 2에서 볼 때 시편들의 공통적인 파괴양상은 휨파괴를 나타냈다. 이는 a/d가 1.67~3.85인 시편 1, 2, 3은 균열형상이 사인장균열 형태를 보이나, 철근비에 따른 전단강성과 휨강성을 비교해 볼 때, 전단강성이 모두 휨강성보다 크므로 극한에는 휨철근의 항복에 의한 휨파괴를 나타내며, 특히 a/d가 1.67의 경우는 수평, 수직전단철근이 과다하게 배근된 깊은보로 휨철근의 항복에 의한 휨파괴를 나타냈다. 시편의 실험치와 두 균열모델에 대한 해석결과는 Fig. 6과 같다.



(a) a/d=1.67 인 경우

(b) a/d=2.5 인 경우

(c) a/d=3.85 인 경우

(d) a/d=6.25 인 경우

Fig. 6 a/d에 따른 하중-변위

a/d에 따른 각 모델의 해석결과, 항복하중의 경우는 고정균열모델과 회전균열모델 모두 실험치에 약 1~6%정도의 오차를 나타내므로 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. a/d에 따른 해석과 실험으로부터 구한 변형에너지의 변화를 나타낸 Fig. 7에서 보면, 사인장강도에 의해 지배되는 a/d가 1.67~3.82인 경우, 회전균열모델에 의한 변형에너지가 실험으로부터 구한 변형에너지에 거의 일치함을 보이며, a/d가 6이

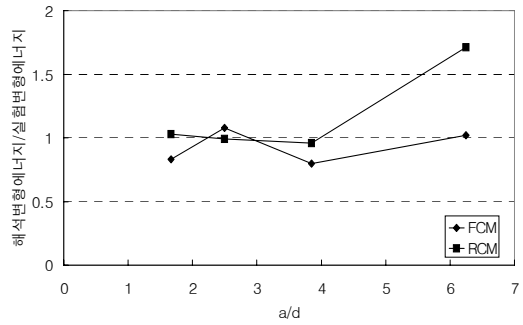
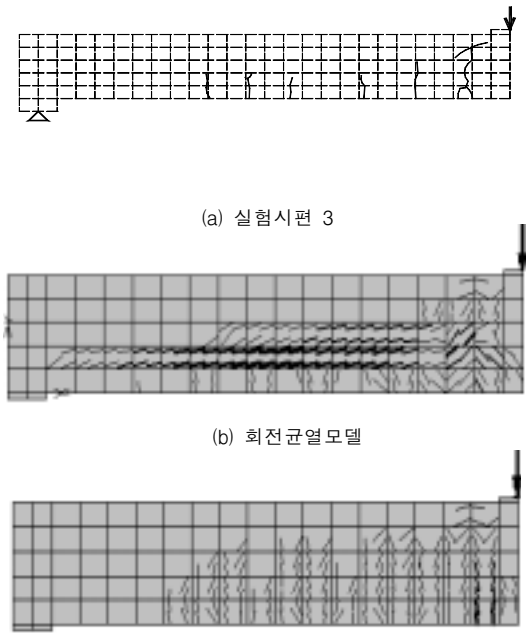


Fig. 7 변형에너지비 (해석/실험)



(a) 실험시편 3

(b) 회전균열모델

(c) 고정균열모델

Fig. 8 극한하중시 두 해석모델별 균열분포 형상(a/d=6.25)

상인 휨거동시 고정균열모델 해석치가 실험치와 거의 일치함을 보였으나 회전균열모델에 의한 해석은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 극한하중시 시편의 거동과는 달리 수평균열이 발생하여 시편과 고정균열모델의 거동과는 전혀 다른 거동 양상을 보임을 알 수 있다.

3.2 전단철근비에 따른 거동의 변화

철근콘크리트 부재의 전단강도는 콘크리트가 부담하는 전단강도와 전단철근이 부담하는 전단강도로 구분할 수 있으며 콘크리트가 부담하는 전단강도는 사인장력이 콘크리트의 인장강도를 초과할 경우의 균열발생과 관계가 있고 전단철근이 부담하는 전단강도는 균열발생 후 균열의 진전 및 전단거동에 영향을 미친다. 따라서 사인장강도에 영향을 받는 a/d=2.5인 시편 2에 대해서 전단철근비를 0.127%, 0.285%, 0.57%로 변화시켜 각각의 균열모델별로 해석하고 전단철근비에 따른 각 모델의 항복하중-변위관계를 그래프로 나타내면 Fig. 9와 같다.

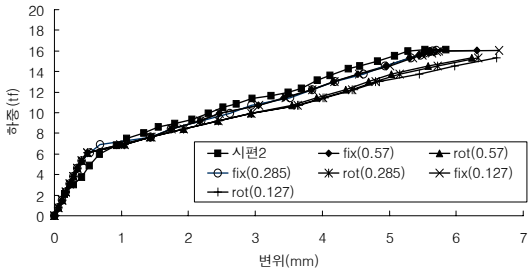


Fig. 9 전단철근비에 따른 하중-변위

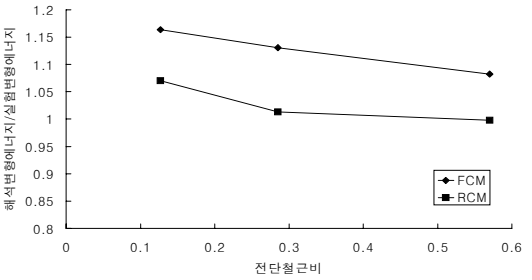
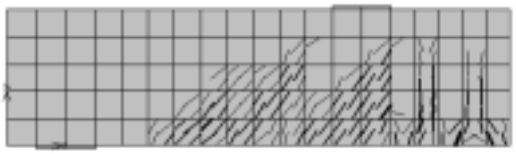
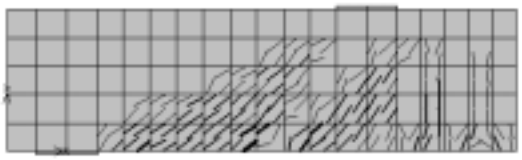


Fig. 10 전단철근비에 따른 변형에너지비



(a) 전단철근비 0.57%



(b) 전단철근비 0.127%

Fig. 11 항복시 회전균열모델의 균열양상

전단철근비의 영향은 사인장균열이 발생한 후 균열의 진전에 영향을 미치므로 Fig. 10에서 보는 바와 같이 전단철근비가 적을수록 고정균열모델은 변형에너지가 약8.2%정도 일정하게 증가함을 보이나, 회전균열모델은 전반으로는 약 7.3%정도 증가함을 알 수 있다. 특히 전단철근비가 0.127에서 갑작스러운 증가를 보인다. 이는 Fig. 11에서 알 수 있듯이 전단철근비가 적을수록 사균열의 분포가 줄어들고 주사인장의 최대 균열폭이 늘어나기 때문으로 해석치의 최대 사인장균열폭에 있어서 전단철근비가 0.57%일 때를 기준으로 볼 때 0.285%와 0.127%가 약 1.57배와 1.95배 정도 증가했기 때문으로 생각된다.

3.3 콘크리트강도에 따른 거동의 변화

콘크리트 강도를 215kgf/㎠, 375kgf/㎠, 600kgf/㎠에 대한 각 균열모델별의 거동은 Fig. 12, Fig. 13와 같다. 콘크리트 강도의 영향은 사인장균열의 발생에 영향을 줄 뿐만아니라 휨강성에도 주기 때문에 강도의 증가에 따라 부재의 항복강도 증가와 함께 취성거동 경향을 보인다. 변형에너지는 Fig. 13에서 알수 있듯이 회전균열모델과 고정균열모델 둘 다 일정한 비율로 증가함을 보여주고 있다.

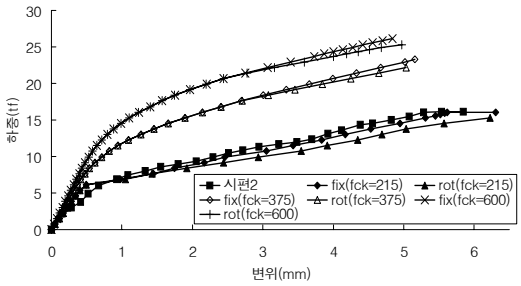


Fig. 12 콘크리트강도별 하중-변위

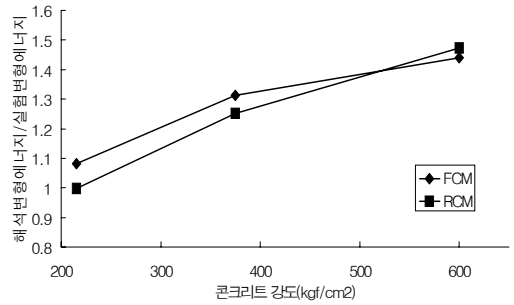


Fig. 13 콘크리트 강도별 변형에너지비

4. 결 론

철근콘크리트보의 균열 발생 및 진전에 대한 거동을 고정균열모델과 회전균열모델을 사용하여 유한요소법으로 해석할 경우 a/d, 전단철근비와 콘크리트 강도의 변화에 따른 두 균열모델의 균열분포의 특성과 거동을 비교, 분석하고 적용성을 검토하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) a/d에 따른 각 균열모델을 사용한 유한요소해석 결과로부터 얻은 거동을 실험값과 비교한 결과, 항복하중은 실험치와 해석치가 비교적 잘 일치하였으며, 변형에너지는 a/d가 1.67~3.85의 범위 즉 부재의 거동이 전단강도 및 사인장강도에 의한 거동시 회전균열모델의 사용이 적절하고 a/d가 6 이상 휨강도에 의한 거동시 고정균열모델의 사용이 보다 적절하다.
2) 전단철근비에 대한 각 균열모델의 거동은 고정균열모델의 경우 전단강도의 감소로 인한 변형에너지가

일정비율로 감소하나 회전균열모델의 경우 전단철근비가 적을수록 사균열의 분포가 줄어들고 주사인장의 균열폭이 늘어나기 때문에 전단철근비가 0.287%~0.127%에서 변형에너지의 갑작스러운 증가를 나타냈다.

3) 콘크리트 강도에 대한 각 균열모델의 거동은 콘크리트 강도가 전단강도 뿐만 아니라 휨강도에도 영향을 미치기 때문에 두 균열모델 모두 항복강도와 변형에너지에서 일정한 비율로 증가함을 보였다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 경기대학교 교내 학술연구비지원에 의해 연구되었습니다.

참고문헌

1. 이봉학 “철근콘크리트 부재의 인장강성효과에 관한 실험적 연구”, 박사학위논문, 한양대학교, 1998년.
2. 장진우 “철근콘크리트 높이가 큰 보의 역학적 거동에 관한 연구”, 석사학위논문, 경기대학교, 2000년.
3. 井上 寬規, 楢貝勇, 中村光. “RC部材におけるせん斷補强鐵筋の効果”, コンクート工學年次論文報告集, Vol. 21, No. 3, 1999, pp. 463-468.
4. 飯塚敬一, 中村光, 足立正信, 楢貝 勇. “不連續回傳ひびわれモデルによる RCの有限要素解析” コンクート 工學年次論文報告集, Vol. 18, No. 2, 1996, pp. 359-364.
5. CEB-FIP Model Code, First Draft, Comittee Euro-International du Beton, Bulletin d'information No. 195,196, Mars, 1990.
6. Cervenka, V. "Constitutive Model for Cracked Reinforced Concrete", Journal ACI, Proc. Vol. 82, Nov.-Dec., No. 6, 1985, pp. 877-882.
7. Crisfield, M.A., Wills, J. "The Analysis of Reinforced Concrete Panels Using Different Concrete Models", Jour. of Engng. Mech., ASCE, Vol. 115, No. 3, March, 1989, pp. 578-597.
8. Darwin, D., Pecknold, D.A.W. "Inelastic Model for Cyclic Biaxial Loading of Reinforced Concrete", Civil Engineering Studies, University of Illinois, July, 1974.
9. Hordijk, D.A. "Local Approach to Fatigue of Concrete, Doctor dissertation, Delft University of Technology", The Netherlands, ISBN 90/9004519-8, 1991.
10. Kolmar, W. "Beschreibung der Kraft uebertragung über Risse in nichtlI-nearen Finite Element Berechnungen von Stahl-betontragwerken", Dissertation, T.H. Darmstadt, 1986, pp. 94.
11. Van Mier J.G.M.“ "Multi-axial Strain softening of Concrete, Part I: fracture", Materials and Structures, RILEM, 1986.
12. Vecchio, F.J., Collins, M.P " Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Beams Subjected to Shear," ACI Journal, Proc. Vol. 83, No. 2, Mar.~Apr., 1986, pp 219-231.

(접수일자 : 2002년 5월 31일)